

УДК 622.276.53.054:658.512.2:519.876.5

В.В. Муленко¹, e-mail: vmulenko@mail.ru; М.Г. Блохина¹; А.В. Ивановский¹; А.Ю. Аксенов¹

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

О цифровизации конструирования ступеней электроприводных лопастных насосов

К конструированию лопастных насосов, являющихся основным видом оборудования для добычи нефти, применяются различные подходы. Основной задачей при этом остается создание оптимального сочетания конструкторских решений, способных обеспечить соответствие различным требованиям, предъявляемым к многочисленным параметрам насоса. При этом производитель, как правило, стремится снизить стоимость и сократить время создания нового насоса. Это может быть обеспечено за счет того, что дорогостоящий трудо- и времязатратный натуральный эксперимент полностью или частично заменяется на эксперимент компьютерный. Однако это возможно лишь в случае создания «цифровых двойников», обеспечивающих тождественность результатов компьютерных и физических (натурных) экспериментов. В то же время, несмотря на стремительно развивающиеся вычислительные технологии, методика определения гидродинамических параметров некоторых типов лопастных насосов для добычи нефти, по мнению авторов статьи, требует серьезных доработок. В подтверждение этого тезиса в статье представлены результаты компьютерных и физических (натурных) экспериментов в целях получения комплексной характеристики некоторых ступеней лопастных насосов для добычи нефти, имеющих разные коэффициенты быстроходности n_s .

Анализ показал, что применительно к ступеням электроцентробежных насосов с низкой и нормальной быстроходностью ($n_s \leq 150-180$) можно говорить о возможности использования «цифровых двойников», поскольку в рабочем диапазоне подач была получена хорошая сходимость результатов компьютерных и физических (натурных) экспериментов. Однако в случае быстроходных, диагональных и осевых ступеней ($n_s > 200$) применение современных программных комплексов и пакетов CFD пока не дает положительных результатов, и для создания «цифровых двойников» данных ступеней в математические модели необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие конструктивные особенности разрабатываемой машины.

Ключевые слова: цифровизация, цифровой двойник, электроприводной лопастной насос, коэффициент быстроходности, CFD, SolidWorks, Star-CCM+.

.....

V.V. Mulenko¹, e-mail: vmulenko@mail.ru; M.G. Blokhina¹; A.V. Ivanovskiy¹; A.Yu. Aksenov¹

¹ Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education "Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)" (Moscow, Russia).

About Electric Submersible Pump Stages Design Engineering Digitalization

There are different approaches and techniques for designing vane pumps. The main task is to create a combination of design solutions that can meet the different requirements for the numerous parameters of the pump.

At the same time, the manufacturer seeks to reduce the cost and time of creating a new pump. This leads to the fact that for this purpose, an expensive labor- and time-consuming natural experiment is tried to replace on computer experiment. In this case it is told about the possibility of creating "digital twins" providing the identity of the results of computer and physical (natural) experiments.

Despite of rapidly developing computational technologies, in order to determine the hydrodynamic parameters of some types of electric submersible pump stages for oil production, according to the authors of this article, serious improvements are still required.

As confirmation, the results of computer and physical (natural) experiments in order to obtain an integrated characteristic of some stages with different specific speed are presented.

The result of the experiments showed that for the ESP low-speed and normal-speed stages it can be said about the possibility of using "digital twins", because in operating performance of pump a good convergence of the results of computer and physical (natural) experiments was obtained. However, for high-speed, Francis-type and axial steps,

the use of modern software systems does not yet give a similar result, therefore to create "digital twins" of these steps, a mathematical model still need to be improved with correction factors taking into account the design features of the developed hydraulic machine.

Keyword: digitalization, digital twin, electric submersible pump, specific speed, CFD, SolidWorks, Star-CCM+.

Большая часть месторождений Российской Федерации находится на поздней стадии эксплуатации. С этим обстоятельством связано наличие ряда осложняющих факторов при подъеме скважинной продукции на поверхность. Основную долю годовой добычи страны обеспечивают механизированные способы добычи, поэтому вопрос повышения эффективности работы нефтедобывающей насосной техники, особенно в осложненных условиях, требует качественной проработки. Есть разные подходы к конструированию лопастных насосов [1–8], но в любом случае основная задача заключается в создании сочетания конструкторских решений, которые могут удовлетворить различные требования, предъявляемые к многочисленным параметрам насоса.

Критерии оптимизации могут меняться в зависимости от конкретных целей, однако основными критериями улучшения работы насоса являются его напор H , м, и полный коэффициент полезного действия (КПД) η , %, при необходимой подаче. Усовершенствование конструкций насосов происходит, главным образом, экспериментально. Действительно, до недавнего времени четкой взаимосвязи между геометрическими размерами и гидродинамическими параметрами, позволяющей конструктору оценить изменение характеристик гидравлической машины при трансформации ее проточной части, выявлено не было.

На сегодняшний день известно, что напор H и полный КПД η зависят от следующего перечня параметров:

$$H, \eta = f(z_{kr}, z_A, D_{1r}, D_{2r}, D_{3r}, D_{4r}, b_{kr}, b_A, \beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}, \beta_{4r}, n, Q, R_o, \mu, \rho), \quad (1)$$

где z_{kr}, z_A – количество лопастей рабочего колеса и направляющего аппарата, шт.; D_{1r}, D_{2r} – диаметр входа и выхода рабочего колеса, мм; D_{3r}, D_{4r} – диаметр входа и выхода направляющего аппарата, м; b_{kr}, b_A – ширина канала рабочего колеса и направляющего аппарата, мм; β_{1r}, β_{2r} – входной и выходной углы лопасти рабочего колеса, °; β_{3r}, β_{4r} – входной и выходной углы лопасти направляющего аппарата, °; n – частота вращения рабочего колеса, об/мин; Q – подача насоса, м³/ч; R_o – шероховатость поверхностей рабочего колеса и направляющего аппарата (допускается применение R_z или R_{max}), мкм; μ, ρ – динамическая вязкость, Па·с, и плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³.

При этом производитель стремится по возможности минимизировать стоимость создания насоса, вероятность возникновения рисков и срок выпуска изделия на рынок. Вследствие

такого стремления дорогостоящий натурный эксперимент может быть полностью или частично заменен на менее трудоемкое и затратное компьютерное исследование. Этот вариант наиболее предпочтителен, например, в серии испытаний по оптимизации профиля лопасти рабочего колеса насоса, по итогам которой насос как результат компьютерного эксперимента создается для проведения эксперимента натурального. В этом случае говорят о возможности создания «цифровых двойников», обеспечивающих тождественность результатов компьютерных и физических (натурных) экспериментов. Однако, несмотря на стремительно развивающиеся вычислительные технологии, методика определения гидродинамических параметров некоторых типов лопастных насосов для добычи нефти, по мнению авторов данной статьи, тре-

Ступени электроприводных лопастных насосов для добычи нефти, созданные на Кафедре «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
Electric submersible pump stages for oil production, developed at the Department of Machines and Equipment for Oil and Gas Industry of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

№ No.	Диаметр условный Outside diameter	Оптимальная подача $Q_{опт}$, м ³ /сут Flowrate at best efficiency point Q_{best} , m ³ /day	Напор при оптимальной подаче H , м Head per stage at BEP H , m	Коэффициент быстроходности n_s Specific speed n_s
1	2A	25	2,0	107,4
2	5	25	5,0	54,0
3	5	40	4,8	70,5
4	5	80	5,4	91,2
5	5	100	4,0	127,8
6	5	125	4,2	137,7
7	5	200	3,8	187,8
8	5A	125	6,2	102,8
9	5A	400	4,5	233,9
10	5A	700	4,7	299,5
11	5A	1000	4,3	376,1
12	6	160	10,0	81,3
13	7A	850	9,5	194,7
14	7A	1300	8,5	261,7

Ссылка для цитирования (for citation):

Муленко В.В., Блохина М.Г., Ивановский А.В., Аксенов А.Ю. О цифровизации конструирования ступеней электроприводных лопастных насосов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 12. С. 64–68.

Mulenko V.V., Blokhina M.G., Ivanovskiy A.V., Aksekov A.Yu. About Electric Submersible Pump Stages Design Engineering Digitalization. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2018, No. 12, P. 64–68. (In Russian)

Параметр рабочих колес Parameter of impellers	Центробежные Centrifugal			Полуосевые (диагональные) Francis-type	Осевые Axial
	Тихоходные Low-speed	Нормальные Normal-speed	Быстроходные High-speed		
n_s	50÷90	80÷180	150÷300	250÷500	500÷1000
Сечение рабочего колеса Section drawing of impeller					
D_2/D_0	3,0÷2,5	2,5÷1,4	3,0÷2,7	1,4÷0,9	0,8
Форма лопасти Blade configuration	Цилиндрическая Cylindrical	Двойной кривизны на входе, цилиндрическая на выходе Double-curved on entering, cylindrical on exiting	Двойной кривизны Double-curved	Двойной кривизны Double-curved	Двойной кривизны Double-curved
Характеристика Characteristics					

Рис. 1. Классификация лопастных насосов по коэффициенту быстроходности n_s

Fig. 1. Classification of vane pumps by specific speed n_s

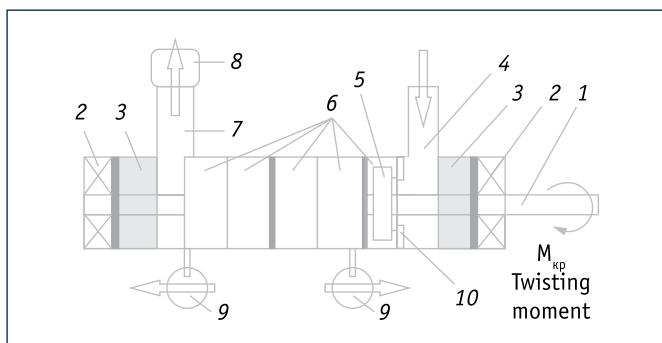


Рис. 2. Схема стенда для испытания ступеней электроцентробежных насосов (ЭЦН):

1 – приводной вал; 2 – подшипник вала; 3 – уплотнительный узел вала; 4 – входной патрубок; 5 – рабочее колесо; 6 – направляющие аппараты; 7 – нагнетательный патрубок; 8 – расходомер; 9 – манометры; 10 – узел опоры рабочего колеса на направляющий аппарат

Fig. 2. Diagram of test bench for electric submersible pumps (ESP) stages:

1 – drive shaft; 2 – shaft bearing; 3 – shaft seal assembly; 4 – inlet; 5 – impeller; 6 – guide vanes; 7 – discharge nozzle; 8 – flowmeter; 9 – pressure gauges; 10 – impeller bearing assembly

бует серьезной доработки. Существует еще один параметр, который вполне способен повлиять на гидродинамические характеристики машины, но реже учитывается при конструировании нефтедобывающей насосной техники, – коэффициент быстроходности n_s .

Стоит отметить, что коэффициент быстроходности n_s необходим для вычисления объемного КПД в оптимальном режиме, а также является одним из определяющих критериев классификации лопастных насосов различных типов [7] (рис. 1). Однако в ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по расчету и конструированию ступеней лопастных насосов были выявлены следующие закономерности:

- характеристики центробежных насосов для добычи нефти ($n_s < 250$), полученные в ходе компьютерного эксперимента с помощью пакета программ для решения задач вычислительной аэро- и гидродинамики (англ. Computational Fluid Dynamics (CFD) – вычислительная гидродинамика), незначительно отличаются от результатов натурального эксперимента;
- характеристики диагональных и осевых ступеней лопастных насосов ($n_s \geq 250$), полученные в ходе CFD-эксперимента, имеют значения в 1,2÷4,0 раза ниже аналогичных показателей, полученных в ходе натурального эксперимента, на всем диапазоне подач.

Кафедра «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина занимается расчетом, проектированием и конструированием ступеней лопастных многоступенчатых насосов для добычи нефти (характеристики некоторых из них представлены в таблице). В целях подтверждения отмеченных закономерностей представим результаты экспериментов на следующих ступенях:

- № 2 (габарит 5, $Q_{\text{опт}} = 25 \text{ м}^3/\text{сут}$, напор при оптимальной подаче $H = 5 \text{ м}$, коэффициент быстроходности $n_s = 54,0$);
- № 5 (габарит 5, $Q_{\text{опт}} = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$, напор при оптимальной подаче $H = 4 \text{ м}$, коэффициент быстроходности $n_s = 127,8$);
- № 7 (габарит 5, $Q_{\text{опт}} = 200 \text{ м}^3/\text{сут}$, напор при оптимальной подаче $H = 3,8 \text{ м}$, коэффициент быстроходности $n_s = 187,8$);
- № 14 (габарит 7А, $Q_{\text{опт}} = 1300 \text{ м}^3/\text{сут}$, напор при оптимальной подаче $H = 8,5 \text{ м}$, коэффициент быстроходности $n_s = 261,7$).

Для проектирования и CFD-эксперимента при выполнении настоящей работы был выбран программный комплекс SolidWorks с дополнительным CFD-пакетом FlowSimulation. В соответствии с ГОСТ 6134–2007 [9] для проведения CFD-экспериментов в качестве рабочей жидкости была выбрана техническая вода с динамической вязкостью $\mu = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и плотностью $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $\approx 0,1 \text{ МПа}$.

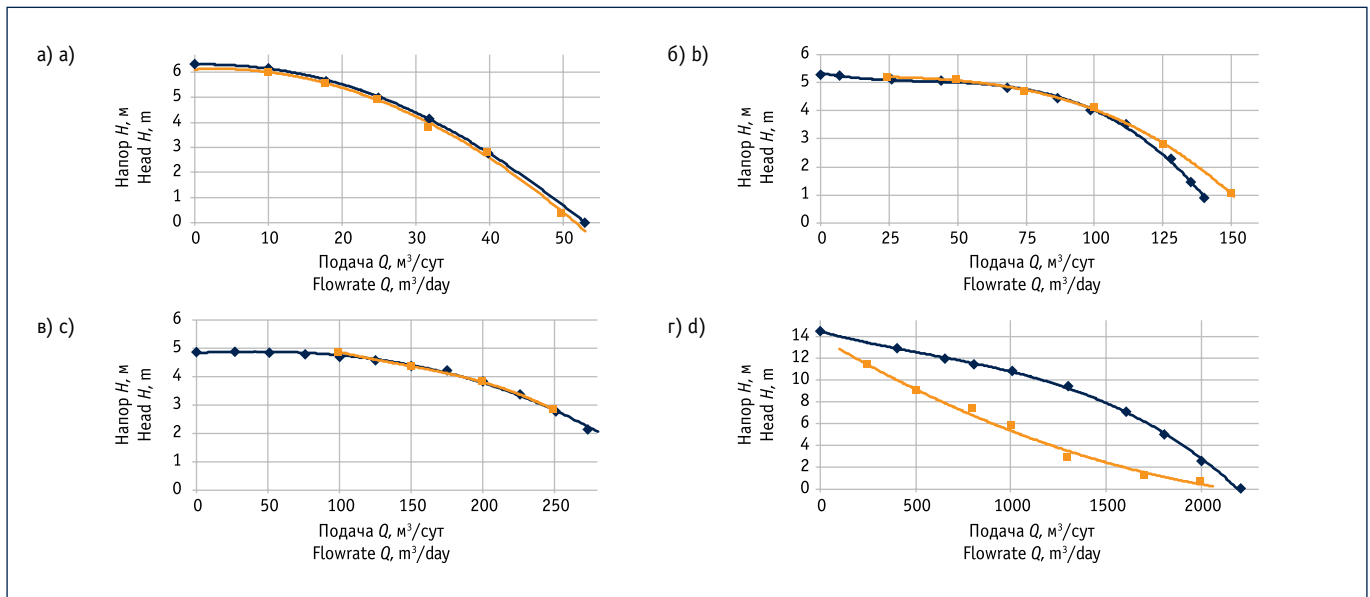


Рис. 3. Напорно-расходные характеристики:

а) ЭЦН5-25 ($n_s = 54,0$); б) ЭЦН5-100 ($n_s = 127,8$); в) ЭЦН5-200 ($n_s = 187,8$); г) ЭЦН7А-1300 ($n_s = 261,7$); синяя линия – результат натурного эксперимента; красная линия – результат CFD-эксперимента в SolidWorks FlowSimulation.

Fig. 3. Head-flowrate curves of: a) ESP stage with "5" outside diameter on 25 m^3/day ($n_s = 54.0$); b) ESP stage with "5" outside diameter on 100 m^3/day ($n_s = 127.8$); c) ESP stage with "5" outside diameter on 200 m^3/day ($n_s = 187.8$); d) ESP stage with "7A" outside diameter on 1300 m^3/day ($n_s = 261.7$); blue line is the result of a physical experiment, the red line is the result of a CFD-experiment in SolidWorks FlowSimulation

В целях сокращения времени расчета и загруженности вычислительной системы задача решалась со следующими допущениями:

- теплообмен и внешние массовые силы отсутствуют;
- фазовые превращения отсутствуют (жидкость не испаряется);
- жидкость однородная несжимаемая;
- режим течения – турбулентный;
- шероховатость стенок – 0 мкм (гладкие).

Натурный эксперимент проводился на стенде, схема которого представлена на рис. 1 [10]. Испытания по получению комплексной характеристики проводились по методике, содержащейся в [9]. Количество уровней расходов жидкости (подачи насоса) составляло не менее восьми. Испытания начинались при полностью закрытой задвижке на нагнетательном патрубке 7 (рис. 2) и проводились до режима «Полностью открытая задвижка».

На рис. 3 представлены сравнения напорно-расходных характеристик для ступеней разной быстроходности, полученных в результате натурного и CFD-эксперимента.

Сравнение напорно-расходных характеристик для ступени насоса с низкой и нормальной быстроходностью свидетельствует о хорошей сходимости результатов натурного и CFD-эксперимента, в первую очередь, в рабочем диапазоне подач. Для данных вариантов можно говорить о возможности использования «цифровых двойников» ступеней ЭЦН.

Незначительное расхождение результатов при испытании ступеней можно объяснить следующими причинами:

- готовое изделие, сделанное на основе модели и конструкторской документации, имеет шероховатость поверхности,

отличную от 0 (микронеровности поверхностей выступают здесь как микролопасти, дополнительно вовлекая в процесс перекачиваемую жидкость);

- при CFD-эксперименте использовались свойства чистой рабочей жидкости, что может не в полной мере соответствовать условиям проведения натурного испытания (возможно некоторое включение механических частиц в жидкости, что могло отразиться на результате).

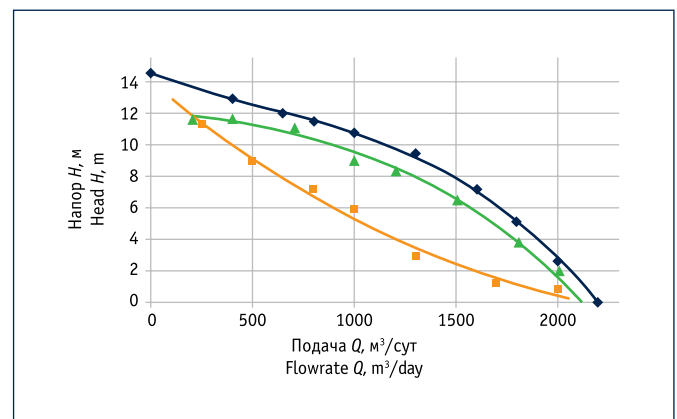


Рис. 4. Напорно-расходная характеристика ступени ЭЦН7А-1300 ($n_s = 261,7$); синяя линия – результат натурного эксперимента, красная линия – результат CFD-эксперимента в SolidWorks FlowSimulation, зеленая линия – результат CFD-эксперимента в STAR-CCM+.

Fig. 4. Head-flowrate curves of ESP stage with "7A" outside diameter on 1300 m^3/day ($n_s = 261,7$); blue line is the result of a physical experiment, the red line is the result of a CFD-experiment in SolidWorks FlowSimulation; the green line is the result of a CFD-experiment in STAR-CCM+

Однако применительно к быстроходным, диагональным и осевым ступеням CFD-эксперимент не показал ожидаемого эффекта. Напорно-расходная характеристика ступени ЭЦН7А-1300, полученная в результате CFD-эксперимента, имеет величины в несколько раз меньшие, чем полученные в результате натурного эксперимента (1,2 раза при 250 м³/сут; 3,2 раза при 1300 м³/сут; 5,1 раз при 1700 м³/сут) (рис. 3г). Была также сделана попытка провести CFD-эксперимент в среде программного комплекса STAR-CCM+, поскольку предполагалось, что в данном комплексе, во-первых, более полно будут учтены мелкие особенности проточной части ступеней (в том числе в пристеночном слое), а во-вторых, широкий спектр моделей турбулентности вихревой вязкости поможет точнее описать движение жидкости и получить распределение скоростей и давлений.

Однако в случае диагональных и осевых ступеней это не дало ожидаемого результата. Как показано на рис. 4, напорно-рас-

ходная характеристика ступени ЭЦН7А-1300, полученная в результате CFD-эксперимента в STAR-CCM+, примерно соответствует результатам натурного эксперимента, но все же имеет отличия, превышающие статистическую погрешность. Эта проблема позволяет сделать следующие выводы:

1) возможности современных программных комплексов для определения гидродинамических параметров в целях создания быстроходных, диагональных и осевых ступеней лопастных насосов пока еще не соответствуют потребностям конструкторов. В связи с этим при создании «цифровых двойников» данных ступеней в математических моделях нужно вводить поправочные коэффициенты, учитывающие конструктивные особенности разрабатываемой машины;

2) для малых коэффициентов быстроходности программный комплекс SolidWorks с CFD-пакетом FlowSimulation обеспечивает создание «цифровых двойников» при расчете и конструировании ступеней ЭЦН.

Литература:

1. Ляпков П.Д. Анализ некоторых особенностей конструирования и эксплуатации погружных центробежных электронасосов для добычи нефти и методика расчета их рабочих органов: дисс. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИнефть, 1955. 211 с.
2. Чичеров Л.Г., Молчанов Г.В., Рабинович А.М. и др. Расчет и конструирование нефтепромыслового оборудования: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1987. 422 с.
3. Каталажнова И.Н. Моделирование и оптимизация энергетических параметров малоразмерных центробежных насосов авиакосмического назначения: дисс. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2005. 187 с.
4. Сазонов Ю.А. Разработка методологических основ конструирования насосно-эжекторных установок для условий нефтегазовой промышленности: дисс. ... докт. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2010. 394 с.
5. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Кузьмин А.В. К вопросу о выборе рабочей области характеристики центробежных насосов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 3. С. 88–92.
6. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Кузьмин А.В. Современные инженерные подходы к проектированию оборудования для добычи нефти и газа // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2014. № 11. С. 17–20.
7. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Деговцов А.В. и др. Проектирование и исследование ступеней динамических насосов: учеб. пособие. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. 124 с.
8. Кузьмин А.В. Исследование характеристик лопастного насоса для добычи нефти при изменении геометрии проточной части его ступени: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2018. 257 с.
9. ГОСТ 6134–87. Насосы динамические. Методы испытаний (с изм. № 1, 2) [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200004546> (дата обращения 18.12.2018).
10. Деговцов А.В., Соколов Н.Н., Ивановский А.В. К вопросу о выборе материала ступеней электроцентробежного насоса для осложненных условий эксплуатации // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 11. С. 88–91.

References:

1. Lyapkov P.D. Analysis of Some Features of the Design and Operation of Submersible Centrifugal Pumps for Oil Production and the Calculating Method for Their Working Elements. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Sciences. Moscow, All-Russia Institute for Oil and Gas Research, 1955, 211 p. (In Russian)
2. Chicherov L.G., Molchanov G.V., Rabinovich A.M., et al. Calculation and Design of Oilfield Equipment. Manual for graduate students. Moscow, Nedra, 1987, 422 p. (In Russian)
3. Katalazhnova I.N. Modeling and Optimization of Energy Parameters of Small-Sized Centrifugal Pumps for Aerospace Purposes. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Sciences. Komsomolsk-on-Amur, 2005, 187 p. (In Russian)
4. Sazonov Yu.A. Development of Methodological Bases for Designing Pumping-Ejector Units for the Conditions of the Oil and Gas Industry. Thesis for a Doctor's Degree in Engineering Sciences. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2010, 394 p. (In Russian)
5. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Kuzmin A.V. To the Question of Choosing a Workspace Characteristics of Centrifugal Pumps. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2015, No. 3, P. 88–92. (In Russian)
6. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Kuzmin A.V. Modern Engineering Approaches to the Oil and Gas Production Equipment Design. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2014, No. 11, P. 17–20. (In Russian)
7. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Degovtsov A.V., et al. Design and Study of Dynamic Pump Stages. Manual. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2015, 124 p. (In Russian)
8. Kuzmin A.V. Study of the Characteristics of a Vane Pump for Oil Production with a Change in the Geometry of the Flow Part of Its Stage. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Sciences. Moscow, 2018, 257 p. (In Russian)
9. State Standard (GOST) 6134–87. Rotodynamic Pumps. Methods of Testing (as updated by changes No. 1, 2) [Electronic source]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200004546> (access mode – December 18, 2018). (In Russian)
10. Degovtsov A.V., Sokolov N.N., Ivanovskiy A.V. On Selection Of Electric Centrifugal Pump Stages Material For Complicated Conditions Of Operation. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2016, No. 11, P. 88–91. (In Russian)